LES で推定された建築物の空力特性の不確定性定量化 Uncertainty Quantification for Aerodynamic Characteristics in LES

浜田 翼*
Tsubasa HAMADA

SUMMARY

With the development of computational power, CFD is becoming a promising tool for wind resistant design in industry. Although CFD is generally regarded as a deterministic exercise, wind-related phenomena and computational setting have many uncertainties. Hence, it is required to take uncertainty in CFD into account. The present paper shows a quantitative evaluation of impact of inflow uncertainty on wind load prediction. Firstly, to identify the magnitude of variability of wind loading, three types of grid resolution models are analyzed with five independent inflow conditions. In addition, we propose to use polynomial chaos to quantify analytically inflow uncertainty in wind load prediction. Wind load is largely changed with slight shift of wind angle. As a result, it is confirmed that importance of consideration on impact of uncertainty in CFD.

key words: Uncertainty quantification, Wind load prediction, Polynomial chaos, Grid sensitivity, LES

1. はじめに

近年の計算機能力の向上に伴い、建築物の耐風設計において数値流体力学(CFD)の重要性が増しており実用化が期待される。一般に CFD は特定の入力条件のもとに1つの出力を与えるという意味で決定論的評価であり、不確定性を考慮することが難しい。しかし、実現象の風や CFD のパラメータ設定には多くの不確定性が内在しており決定論的よりも確率論的であり、実用化のためには CFD においても不確定性を考慮することが、数値解の信頼性の観点から重要である。

近年の不確定性解析では多項式カオス¹⁾に代表される、少ないサンプルをもとに代理モデルを近似し不確定性定量化を実施する手法が多く用いられている。Mariotti²⁾らは、アスペクト比 5:1 の角柱の空力特性における流入条件の不確定性定量化を実施し、既往の実験や数値解のアンサ

ンプル平均と比較した。しかしながら、構造物の空力特性における不確定性定量化に関する知見は非常に限られているのが現状である。

本研究では、まず CFD を用いた建築物の風荷重推定における不確定性の大きさを評価する。さらに格子解像度が不確定性に与える影響も評価する。次に多項式カオスを用い、角柱と隅丸角柱の空力特性に対し、風向角の変化に対して出力が非線形的に変化する不確定性範囲を設定し、不確定性定量化を行う。また、そのような不確定性範囲における多項式カオスの適用性も検証する。

2. 格子解像度の変化が高層建築物の空力特性のばらつきに与える影響の把握

本章では、異なる格子解像度の計算モデルごとに5波の流入変動風における空力特性のばらつきの大きさと、格子解像度が不確定性に与える影響を明らかにする。

* 東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系 都市・環境学コース
School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology
(指導教員 田村 哲郎 教授)

2.1 計算モデルと計算条件

対象とする高層建築物は周辺市街地に囲まれており、外装部材等で詳細に再現されている（図1）。風向角は既往の研究³⁾において実施された72風向の風洞実験から、住宅棟に最小ピーク風力係数(C_{p_min})が発生した風向角 80° を対象とした。格子解像度は5千万(50M)、1250万(12M)とし、既往の研究における2億(200M)と実験値とそれぞれ比較した。ただし、これらの格子解像度の分布は相似ではない。

本解析は非構造格子に基づく有限体積法ソルバーFrontFlow/Redを用いた。支配方程式は、フィルター操作を施した連続の式とNavier-Stokes方程式である。時間積分はSMAC法によるEuler陰解法、空間離散化は2次中心である。移流項には計算安定性確保のため2次中心項に1次精度風上差分を5%ブレンドした。SGSモデルは標準Smagorinsky($C_s=0.10$)とし、壁面付近ではVan Driest型の減衰関数を使用した。

流入境界において、流入変動風はJarrin⁴⁾らによる合成渦法を用い既往の風洞実験³⁾で用いられた実験気流の値をターゲットに5波作成し、時・空間補間した流速をディリクレ条件として与えている。流出境界においては速度をノイマン条件で与え、圧力はノイマン条件、およびSMAC法による圧力の補正係数に関してはディリクレ条件で与えている。側面と上面はFree-Slip条件とした。ただし、流入と流出境界では圧力の補正関数をゼロとした。壁面と物体表面は壁関数の境界条件を与えた。

2.2 数値解析結果とばらつきの大きさ

図2に測定点210と361の各格子解像度における5波の流入変動風における平均風圧係数と最小ピーク風圧係数をプロットしている。平均風圧係数は格子解像度によって予測される値に傾向は見られるものの、5波のプロットの最大・最小のばらつき幅に大きな変化は見られない。しかしながら、最小ピーク風圧係数では、測定点210において格子解像度の変化によってばらつきが大きく変化していることが分かる。一方、測定点361では比較的ばらつきの幅は安定している。これは、流れの変動が大きい隅角部か、比較的流れの安定している後流に測定点が位置するかで大きく左右されられると考えられる。同様に、図3に全体力係数の平均を示す。全ての係数においてばらつきの幅は安定している。全体力は風圧係数の積分値であり、ここではさらに時間の平均値であるため、格子解像度によるばらつきが小さくなったためと考えられる。

以上より、格子解像度による空力特性のばらつきは、測定点位置やその空力特性の性質（平均値、ピーク値、

図1 解析モデルと周辺市街地

図2 測定点210・361における風圧係数のばらつき
(上) 平均風圧係数 (下) 最小ピーク風圧係数

図3 全体力係数のばらつき

(上) CMx_ave (左) CMy_ave (右) CMz_ave

積分値) によって大きく変化することが確認された。

3. 角柱と隅丸角柱の空力特性における不確定性定量化

前章において流入のばらつきが建築物の空力特性に与える影響は大きいことを確認した。そこで本章では建築物の一般的な形状である角柱と隅丸角柱の空力特性に対し、流入の不確定性が与える影響を定量的に明らかにする。近年の不確定性定量化の研究では、応答局面法に分類される少ないサンプルから代理モデル等を構築する多項式カオス(PC)¹⁾やKriging⁹⁾などが多く用いられ、その有効性と適用性が報告されている⁶⁾⁷⁾。本研究では計算コストも低く、不確定性の影響の評価と同時に感度解析も容易に実施できるPCを用い不確定性定量化を行う。

3.1 多項式カオスと不確定性パラメータ

PC では不確定な入力 ξ に対する求めたい出力 Quantity of interest(QoI)の確率論的出力 $y(t, \mathbf{x}, \xi)$ を以下のように多項式展開する。

$$y(t, \mathbf{x}, \xi) = \sum_{i=0}^{Np-1} u_i(t, \mathbf{x}) \cdot \Psi_i(\xi) \quad (1)$$

ここで、 $u_i(t, \mathbf{x})$ は決定論的係数、 $\Psi_i(\xi)$ は確率変数 ξ の直交多項式数列、 Np は多項式の項数を表す。直交多項式数列は入力の不確定性の確率分布に基づき Wiener-Askey Scheme(WSA)¹⁾より決まる。決定論的係数を算出後、QoIの平均 μ と分散 σ^2 は以下のように容易に求めることができる。

$$\mu = u_0 \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{Np-1} (u_i^2 \Psi_i^2) \quad (3)$$

また、得られた代理モデルに入力で仮定した不確定性範囲内での乱数を与えることでQoIの確率分布を得ることもできる。さらに、多項式カオスの直交関数の組み合わせによって表現されるという Sobol 分解と同様の性質から、以下のような主 Sobol 係数 S_i と交互 Sobol 係数 S_{ij} を求めることができる⁸⁾。

$$S_i = \frac{\sigma^2[E(u|\xi_i)]}{\sigma^2(u)} \quad (4)$$

$$S_{ij} = \frac{\sigma^2[E(u|\xi_i, \xi_j)]}{\sigma^2(u)} \quad (5)$$

Sobol 係数は、出力のバラつきに対して入力した不確定性パラメータの影響度を表すもので、主 Sobol 係数は単体の不確定性パラメータの影響度、交互 Sobol 係数は複数の不確定性パラメータの相互作用による影響度を示す。

本研究の不確定性パラメータは、空力特性に大きく影響すると考えられる風向角 α とレイノルズ数 Re とした。

表 1 に本研究の不確定性パラメータの範囲と不確定性の確率分布を示す。一様分布と仮定したため WSA¹⁾より直交多項式数列はルジャンドル多項式数列となる。多項式次数 2 次まで求めるものとする。例えば、2 次の多項式展開をする場合は、決定論的解析のサンプル点として 3 次ルジャンドル多項式の零点を用い、風向角 α とレイノルズ数それぞれ 3 点ずつを組み合わせた計 9 回の決定論的解析を実施する。多項式次数 1 次、2 次それぞれの決定論的解析を行なうサンプル点を図 7 に示す。QoI は、前章においてばらつきの幅が比較的案的していた全体力係数と平均風圧係数とする。

3.2 計算条件

本研究では LES を用い決定論的解析を行なう。計算領域を図 8、計算条件を表 2 に示す。流入境界は一様流とし、流出境界はノイマンで与えた。上面と下面は Free-Slip 条件とし、角柱表面は no-slip としている。

表 1 不確定性パラメータ

	不確定性	確率分布	区間
角柱	風向角	一様分布	[12° - 14°]
	レイノルズ数		[1000 - 10000]
隅丸角柱	風向角	一様分布	[5° - 7°]
	レイノルズ数		[1000 - 10000]

図 4 決定論的解析のサンプル点

図 5 計算モデル

表 2 計算条件

コード	FrontFlowRed, FVM
計算格子	非構造格子
空間離散化	2次中心差分 2次中心差分(95%)+1次風上(5%) (移流項)
時間積分	SMAC, Euler陰解法
SGSモデル	Dynamic Smagorinsky model

3.3 不確定性定量化結果

表3に1次・2次多項式における抗力係数(C_D)と揚力係数(C_L)の確率論的平均と標準偏差を示す。抗力係数の平均 $t\text{-ave}(C_D)$ においては、平均、標準偏差ともに1次・2次多項式で推定された値が近く、図6の確率分布も比較的同様の傾向を示している。しかし、揚力係数の平均 $t\text{-ave}(C_L)$ においては、平均の値は比較的近いものの、1次における標準偏差は非常に小さい。本来であれば、平均と標準偏差の収束が確認できるまで多項式次数を上げるべきだが、計算コストの関係上、以降は2次多項式の結果に基づいて議論をすすめる。

図7に角柱表面の平均風圧係数の平均と標準偏差とSobol 係数を示す。区間CDでは標準偏差が比較的大きい。これは風向角 13° 付近で、前縁角部Dから剥離した流れが再付着するか完全剥離するかの境目となっており、再付着の有無によって圧力の分布が大きく変わるため比較的大きなばらつきを示している。Sobol 係数に関しては、CD面においてはレイノルズ数が大きな値を示している。これは角部Dで剥離した流れの再付着の有無に接近流の流速が大きく関わるためだと考えられる。反対に完全剥離が発生するAB面では風向角が大きなSobol 係数を示すが、これは角柱の角部で剥離が固定されるため比較的レイノルズ数の影響を受けにくく、相対的に風向角の影響が大きくなったと考えられる。

図8にいくつかのサンプル点における平均流を示している。風向角のみを変えた場合はAB面における循環流の位置や大きさの変化や、後流域の構造に大きな影響を与えていることが分かる。これら変化の様子はSobol 係数によって示されているものと一致している。

4. 結論

本研究では、まず流入条件のばらつきが空力特性のばらつきに与える影響を評価し、同時にばらつき大きさに格子解像度が与える影響を明らかにした。次に多項式カオスを用いて簡易な形状モデルの空力特性における流入条件の不確定性定量化を行った。

空力特性のばらつきは、測定点位置や格子解像度、その空力特性の性質(平均値、ピーク値、積分値)によりばらつきの変化の傾向は異なることが確認された。PCを用いた不確定性定量化では、わずかな流入条件のばらつきが、空力特性に大きく影響することが確認され、今後数値解を利用した設計時において不確定性を考慮することの重要性が示唆された。また風向角 13° 付近において鋭敏に変化する流体现象の特徴を捉えることができ、本

研究ではPCが有効であったと考えられる。

表3 角柱の抗力・揚力係数の確率論的平均と標準偏差

	多項式次数	$t\text{-ave}(C_D)$	$t\text{-std}(C_D)$	$t\text{-ave}(C_L)$	$t\text{-std}(C_L)$
	次数1	1.638	0.168	-0.905	0.456
平均	次数2	1.672	0.174	-0.822	0.489
	次数1	0.059	0.012	0.031	0.105
標準偏差	次数2	0.056	0.063	0.148	0.097

図6 $t\text{-ave}(C_D)$ と $t\text{-ave}(C_L)$ の平均の確率分布

図7 角柱の風圧係数の確率論的出力(上)とSobol 係数(下)

図8 サンプル点における平均流(角柱)

参考文献

- 1) Xiu, Dongbin, and George Em Karniadakis. "Modeling uncertainty in steady state diffusion problems via generalized polynomial chaos." Computer methods in applied mechanics and engineering 191.43 (2002): 4927-4948.
- 2) Mariotti, Alessandro, Lorenzo Siconolfi, and MARIA VITTORIA Salvetti. "Stochastic sensitivity analysis of large-eddy simulation predictions of the flow around a S: 1 rectangular cylinder." European Journal of Mechanics-B/Fluids 62 (2017): 149-165.
- 3) 田村哲郎, et al. "数値流体計算による実建築物の風荷重評価" 風工学シンポジウム論文集 第 24 回 風工学シンポジウム論文集, 一般社団法人 日本風工学会, 2016.
- 4) Jarin, N., et al. "Reconstruction of turbulent fluctuations for hybrid RANS/LES simulations using a synthetic-eddy method." International Journal of Heat and Fluid Flow 30.3 (2009): 435-442.
- 5) Xu Wu, Chen Wang, Tomasz Kozłowski, "Kriging-based surrogate models for uncertainty quantification and sensitivity analysis." M&C-2017, International Conference on mathematics & Computational method applied to Nuclear Science & Engineering, Jeju, Korea (2107).
- 6) L.M.M. van den Benjamin Sande, "Uncertainty quantification for wind energy applications – Literature review." Centrum Wiskunde & Informatica (2017), Report number: SC-1701.
- 7) Arun Kaintura, Tom Dhaene, Domenico Spina, "Review of polynomial chaos-based method for uncertainty quantification in modern integrated circuits" Journal of electronics 7/30 (2018); <https://doi.org/10.3390/electronics7030030>.
- 8) Bruno Sudret, "Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions." Reliability Engineering & System Safety 98. 7 (2008); 964-979.